

OULUN SEUDUN
AMMATTIKORKEAKOULU



Kyösti Heikkinen

KUUMAPURISTUSTELAN LÄMPÖTILAN MITTAUKSEN JA SÄÄDÖN KEHITTÄMINEN

KUUMAPURISTUSTELAN LÄMPÖTILAN MITTAUKSEN JA SÄÄDÖN KEHITTÄMINEN

Kyösti Heikkinen
Opinnäytetyö
Syksy 2013
Automaatiotekniikka
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Automaatiotekniikka

Tekijä: Kyösti Heikkinen

Opinnäytetyön nimi: Kuumapuristustelan lämpötilan mittauksen ja säädön kehittäminen

Työn ohjaaja: Tero Hietanen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2013

Sivumäärä: 41+1

Työn toimeksiantaja on Oulun seudun ammattikorkeakoululla tekniikan yksikössä toimiva painettavan älykkyyden kehittämislaboratorio Prinlab. Laboratorion painokoneen kuumapuristussyksikön lämmönsäätö oli puutteellinen luotettavien testiajojen suorittamiseen. Telan pintalämpötilan vakaana pitäminen vaati jatkuvaa säätimen käsikäyttöä, vaikka käytössä oli PID-säädin. Koneen käyttäjän piti mitata telan pintalämpötila käsin erillisellä mittalaitteella, koska säätimelle mittaustiedon antava anturi oli sijoitettu toimilaitteen sisälle.

Työn tavoitteena oli muuttaa lämpötilan mittauspaikkaa siten, ettei käyttäjän enää tarvitsisi tarkistaa telan pintalämpötilaa erillisellä mittalaitteella. Lisäksi haluttiin, että telan pintalämpötila pysyisi vakaana ja lämpötilan muutoksia voitaisiin ohjata nopeasti säätimellä.

Työssä tehtiin prosessikokeita, joilla selvitettiin lämmitysjärjestelmän prosessimalli, tämän pohjalta määritettiin telan pintalämpötilan säätöön tarvittavat parametrit. Lämpötilan mittaus muutettiin mitattavaksi telan pinnasta infrapuna-anturilla. Aineistona käytettiin automaatiotekniikan opintojen aikana tutuksi tulleita lähteitä.

Työn jälkeen koneen käyttäjän ei enää tarvinnut tarkistaa telan pintalämpötilaa erillisellä mittalaitteella, vaan lämpötila luettiin suoraan säätimen näytöltä. Telan pintalämpötila pysyi testiajojen aikana vakaana automaattiohjauksella. Lämpötilan muutokset oli mahdollista tehdä nopeammin ja vakaammin säätimellä.

Telan lämmitystä tulisi vielä kehittää, sillä telan pintalämpötilassa esiintyy lämpötilaeroja, jotka voivat olla seurausta lämmönlähteen sijainnista, telan materiaalisista ominaisuuksista sekä puutteellisesta lämmöneristyksestä.

Asiasanat: PID, infrapuna-anturi, säätöpiiri, prosessimalli

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Automation Technology

Author: Kyösti Heikkinen

Title of thesis: Improvement to measure and control temperature of a hot emboss roll

Supervisor: Tero Hietanen

Term and year when the thesis was submitted: Fall 2013 Number of pages: 41+1

This thesis was carried out in development laboratory of printed intelligence, Oulu University of Applied Sciences. Hot emboss unit of a printing machine was developed to study mass production capabilities of printed intelligence. Preliminary results of testing showed that heat control of the hot emboss roll was inadequate for reliable testing. The maintenance of steady temperature required continuous manual control of the heat controller although PID – control was available. Surface temperature of the roll was measured by using separate measuring device, because temperature measuring device for the heat control was placed inside of an actuator.

The objective of this thesis was to change the location of temperature measure and thus minimize the use of separate temperature measuring device. Aim was also to improve response speed of the temperature control and maintenance of stable surface temperature.

Execution was done by making process tests which gave information for composing a process model. Based on process model it was possible to calculate tuning parameters needed for controlling surface temperature of the roll. Temperature measurement was done by infrared sensor which measured directly surface temperature of the roll. Theory behind execution was gathered from familiar sources which become known during automation technology studies.

After completion user was no longer obligated to measure surface temperature of the roll with separate measuring device. One could see temperature directly from controllers display. The roll kept stable surface temperature during printing process with automation control and necessary temperature changes were faster and more stable.

There is still some improvement to be done for the heating system. Fluctuation detected in surface temperature of the roll may be resulted from the location of heat source, material quality of the roll and insufficient heat insulation.

Keywords: PID, process model, infrared sensor, control circuit

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO.....	7
2 TEORIAOSA	8
2.1 Lämpötilan mittaus kosketustekniikalla ja optisesti	8
2.1.1 Kosketusmittaus	8
2.1.2 Optinen mittaus	9
2.2 Säättöpiiri	10
2.2.1 Prosessimalli.....	11
2.2.2 Toimilaite	11
2.2.3 Mittaus.....	12
2.3 Säättömenetelmät	12
2.3.1 Kaksipistesäätö.....	12
2.3.2 PID-säätö.....	13
2.4 Prosessimalli ja prosessikokeet.....	16
2.4.1 Prosessityypit	17
2.4.2 Kokeellinen prosessimallin määrittäminen	17
2.5 PID-säädön viritys	20
Lambda-viritus	21
3 KOKEELLINEN OSUUS	25
3.1 Laitteiston esittely.....	25
3.1.1 Kuumapuristusyksikkö.....	26
3.1.2 Muovialusta.....	27

3.1.3 Säädin	27
3.2 Kokeen alkutilanne	28
3.3 Prosessikokeet.....	29
3.3.1 Mittausjärjestelyt.....	29
3.3.2 Askelvastekokeet.....	30
3.4 Mittaustulokset.....	31
3.5 Anturin valinta ja käyttöönotto	33
3.6 Säätimen viritys	35
3.6.1 PI-säätö.....	35
3.6.2 PID-säätö.....	38
4 POHDINTA.....	40
LÄHTEET	41
LIITEET	42

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tekijä työskentelee Oulun seudun ammattikorkeakoululla Prinlab-kehityslaboratoriossa painettavan älykkyyden hankkeissa, joissa tutkitaan painettavan älykkyyden valmistusmenetelmiä. Tutkimusta varten laboratorioon hankittiin Suomen optomekaniikka Oy:n valmistama R2R-painokone, jolla tutkitaan painettavan älykkyyden massavalmistuksen menetelmiä. Painokoneen kuumapuristusyksiköllä painetaan muoviselle alustamateriaalille kuviota paineen ja lämpötilan avulla. Yksikköä käytettäessä havaittiin haastavaksi painotelan pintalämpötilan muuttaminen ja vakaana pitäminen. Tarkempi tarkastelu osoitti hallintalaitteiden ja -menetelmän olevan riittämättömän luotettavaan lämpötilan hallintaan. Ennen lämpötila mitattiin läheltä lämmitysvas- tusta, jolloin mittalaite ei havainnut hallintasuureen vaihteluita painorajapinnassa. Painokoneen valmistaja ei ollut ottanut huomioon hukkalämmön muodostumista, jota painoyksikössä tapahtuu runsaasti prosessin aikana, tai toimilaite oli alimitoitettu.

Opinnäytetyön tavoitteeksi asetettiin mittauspaikan muuttaminen ja säätimen uudelleen virittäminen. Mittauspaikaksi valittiin telan pinta, josta lämpötila mitattiin optisella infrapuna-anturilla. Kuumapuristusyksiköllä tehdään testiajoja, joilla haetaan painopinnoille ja alustamateriaaleille sopivia parametreja, mikä tarkoittaa suuria määriä lämpötilan asetusarvon muutoksia. Lämpötilan säädöstä haluttiin nopea asetusarvomutoksia varten, mutta vakaa luotettavan painotapahtuman takia. Säädön virityksestä tehtiin kompromissi näiden kahden vaatimuksen väliltä.

Työn onnistuneen lopputuloksen saamiseksi vaadittiin tekijältä ennalta opittujen tietojen lisäksi syvempää tutustumista prosessimallin määrittämiseen, prosessikokeiden järjestämiseen ja säätimen viritysparametrien selvittämiseen. Lisäksi tarvittiin teorian yhdistämistä käytäntöön PID-säätimellä, jonka toimintaperiaate poikkesi ennalta opituista teorioista.

2 TEORIAOSA

Tässä työssä käsitellään painokoneen kuumapuristusyksikön lämpötilan mittauksen, säädön ja hallinnan parantamista automaatio-ohjauksella. Teoriaosassa käydään läpi työssä sovelletut teoriat, jotka liittyvät lämpötilan mittaustekniikoihin, säätöpiirin ja säätömenetelmien tietämiseen, prosessimallin määrittämiseen ja prosessikokeiden suorittamiseen sekä PID-säädön virittämiseen.

2.1 Lämpötilan mittaus kosketustekniikalla ja optisesti

Työssä telan lämpötilaa mitattiin kahdella eri tekniikalla. Mittaustekniikasta riippuen tulee ottaa huomioon niiden mittaustarkkuuteen vaikuttavat asiat.

2.1.1 Kosketusmittaus

Kosketusmittauksessa tuntoelin on kosketuksissa mitattavaan kohteeseen eli se on asennettu kohteen sisälle tai ulkopintaan. Kosketustuntoelimen tulisi seurata pelkästään kohteen lämpötilaa, eikä siihen saisi vaikuttaa ympäristön lämpötila, joka aiheuttaa haasteita suurissa lämpötilaeroissa. (Halko, Härkönen, Lähtenmäki & Välimaa 1993, 51.)

Mitattaessa lämpötilaa kappaleen sisältä tuntoelin asennetaan kappaleeseen porattuun reikään. Tärkeää on, että tuntoelin jää tiiviisti kahden ainekerroksen väliin, jolloin lämmönsiirto on tasainen. Tuntoelimen ja reiän välillä tulee olla tarkka sovite, tai vaihtoehtoisesti tuntoelin tiivistetään reikään tulppaamalla. (Halko ym. 1993, 51.)

Kappaleen pintaan sijoitettu tuntoelin liitetään esimerkiksi liimaamalla, teipillä tai puristimella. Vakaamman lämpötilalukeman saamiseksi tuntoelimeen voidaan liittää taustalevy, joka kasvattaa termistä kosketusta kappaleen ja tuntoelimen välillä. Kiinnitystapaa valittaessa ja erityisesti taustalevyä käytettäessä tulee ottaa huomioon lämpösäteilyn vaikutukset. Tuntoelimen, kiinnitysaineen ja taustalevyn säteilyominaisuuksien tulisi

vastata kappaleen säteilyominaisuuksia. Esimerkiksi kirkkaan kappaleen pinnalla, joka altistuu suoralle auringonvalolle, ei ole suositeltavaa käyttää mustaa taustalevyä tuntoelimen kiinnittämisessä. (Halko ym. 1993, 51.)

Pyörivän telan pintalämpötila voidaan mitata pintaa koskettavalla liukuanturilla. Mittaustulosta kuitenkin vääristää syntyvä kitkalämpö. Tämä ongelma voidaan korjata siten, että anturi asennetaan erittäin lähelle telan pintaa kuitenkaan koskettamatta kohdetta. (Halko ym. 1993, 52.)

2.1.2 Optinen mittaus

Kappaleen sähkömagneettisen säteilyn intensiteetti ja aallonpituusjakauma riippuvat kappaleen pinnanlaadusta ja lämpötilasta. Tämän lämpösäteilyn perusteella voidaan mitata kappaleen pintalämpötila, kunhan tunnetaan kappaleen pinnanlaatu ja säteilyn aallonpituusalue. Kappaleen lämpösäteilyä mittaavaa laitetta kutsutaan pyrometriksi. Infrapunapyrometrillä mitattavan säteilyn aallonpituusalue on rajattu infrapuna-alueelle. (Halko ym. 1993, 52.)

Optiset lämpöanturit toimivat ilman kosketusta kohdekappaleeseen, mikä on selkeä etu mitattaessa korkean lämpötilan kappaleita. Kosketusmittaustekniikassa tuntoelin vaurioituu ajan kuluessa korkeissa lämpötiloissa, kun taas optiset anturit eivät altistu niin suurille lämpötiloille etäisyyden ansiosta. Etäisyyden suuruudella ei ole merkitystä mittauksen, mutta suuri etäisyys altistaa helpommin mittaustulosta heikentäville ympäristötekijöille. Optiseen mittaustarkkuuteen ei vaikuta kappaleen liikkuminen. Näin ollen mitattava kappale voi olla asennettuna paikalleen tai liikkeeseen. Mittaustarkkuutta sen sijaan heikentävät esimerkiksi auringosta tuleva säteily ja mitattavassa kohteessa esiintyvät paikalliset suuret lämpötilaerot. (Halko ym. 1993, 53.)

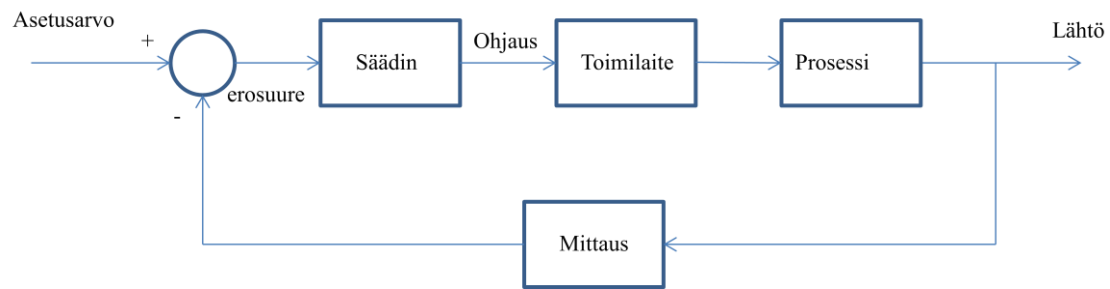
Optista mittausta käytettäessä on tärkeää tuntea kappaleen emissiviteetti ε , joka tarkoittaa pinnan tai kappaleen kykyä lähettää säteilyä. Se määritellään kappaleen lähettämän säteilyenergian suhteena mustan kappaleen samassa lämpötilassa ja muutenkin samalaisissa olosuhteissa lähettämään säteilyyn. Vain ideaalisella säteilijällä, eli mustalla kappaleella $\varepsilon = 1$. Käytännössä ideaalisen kappaleen emissiviteettiä ei päästä, mutta

mattamustaksi maalatun pinnan ε on noin 0,97–0,99. Kirkkaan metallin pinnalla vastaava luku on noin 0,45. Mitä pienempi on pinnan ε , sitä epäluotettavampi lämpötila on mitata optisesti. Kirkas pinta toistaa helpommin esimerkiksi auringosta tulevaa säteilyä. Tämä ei ole ongelma kun kappaleen lämpötila on tarpeeksi suuri esimerkiksi 1 000 °C. Ympäristön lämpötilaa lähellä olevan kappaleen luotettava mittaaminen on kuitenkin haasteellista. Tällöin onkin suositeltavaa maalata kirkaspintaiseen kappaleeseen musta raita, josta lämpötila mitataan. (Halko ym. 1993, 53.)

2.2 Säättöpiiri

Säättöpiiri koostuu säädettävästä prosessista, toimilaitteesta, säätimestä ja mittauksesta (kuvio 1). Säädin ohjaa toimilaitetta joko analogisena virtaviestinä tai digitaalisena viestinä. Toimilaite muuttaa prosessissa hallittavaa suuretta, kuten esimerkiksi lämpötilaa. Hallittavan suureen olotilaa mitataan anturilla, joka lähettää olotilan arvon säätimelle. Säädin vertaa saatua arvoa asetusarvoon ja muuttaa tarvittaessa ohjauksen arvoa. Säätimen ohjauksella ohjataan toimilaitetta. (Harju & Marttinen 2000, 13.)

Säättöpiiri voi olla avoin tai suljettu. Avoimessa säättöpiirissä säädin ei käytä mittaustietoa toimilaitteen ohjaukseen, vaan säätö tapahtuu käsiohjauksella. Käsiohjausta käytetään pääsääntöisesti silloin, kun tehdään prosessikokeita tai järjestelmässä on häiriö, jonka takia automaattiohjaus ei ole mahdollista. Suljetussa säättöpiirissä säädin muokkaa ohjausta saadun mittatiedon mukaan. Säädin on tällöin automaattiohjauksella. Suljettu säättöpiirin heikkous on mahdollisuus epästabiiliin käyttäytymiseen, millä tarkoitetaan tilaa, jossa säädin alkaa vahvistaa säättöpiirissä esiintyvää huojuntaa. Pahimmassa tapauksessa huojunta ylittää toimilaitteen hallintarajat, jonka jälkeen prosessia ei saa enää hallintaan säätimellä. (Harju & Marttinen 2000, 13.)



KUVIO 1. Suljetun säätöpiirin peruskomponentit (Harju & Marttinen 2000, 13)

2.2.1 Prosessimalli

Prosessin hallinta edellyttää prosessin tuntemista. Tulee tietää, kuinka prosessi käyttäytyy asetusarvoalueella ja kuormitushäiriötilanteissa. Prosessimalli sisältää kuvauksen prosessista sekä mahdollisesti toimi- ja mittalaitteen, mikäli niiden toiminta on selvästi prosessia nopeampi. Jos tämä ei pidä paikkaansa, vaikka toimilaitteen kohdalla, tulee toimilaitteen käyttäytyminen olla omana mallina. (Harju & Marttinen 2000, 14.)

Prosessimalli kuvataan matemaattisena mallina. Tämä malli antaa käyttäjälle tietoa prosessin ominaisuuksista, ja mallin avulla voidaan ennakoida prosessin käyttäytymistä. Prosessimalli muodostetaan vertailemalla ohjaus- ja mittasignaalia keskenään. Katsotaan, kuinka ohjaussignaalin muutos vaikuttaa mittasignaaliin ja minkä ajan kuluessa muutos tapahtuu. (Harju & Marttinen 2000, 14.)

2.2.2 Toimilaite

Toimilaite toteuttaa säätimeltä tulevan ohjauskäskyn ja muuttaa säädettävää suuretta (Harju & Marttinen 2000, 14). Esimerkiksi prosessin lämpötilaa kasvatetaan lisäämällä lämpövastuksen tehoa. Toimilaite tulee olla mitoitettu prosessiin sopivaksi. Liian teho- kaan toimilaitteen hyötysuhde ja ohjaustarkkuus on heikko, ja liian pienen toimilaitteen käyttö hidastaa prosessin ylösajoa ja prosessin muutoksiin reagointia.

2.2.3 Mittaus

Mittalaite tarkkailee mitattavaa suuretta, kuten lämpötilaa, ja lähettää säätimelle tiedon suureen tilasta. Luotettavan mittauksen saavuttamiseksi mittasignaalista tulee poistaa kohina. Mittalaitteen tarkkuus on rajoittavana tekijänä määritettäessä prosessin säätöjä. Esimerkiksi lämpötilaa ei voida säätää puolen asteen tarkkuudella, jos mittalaitteen tarkkuus on yksi aste. (Harju & Marttinen 2000, 14.)

2.3 Säätömenetelmät

Automaatiossa on käytössä erilaisia säätömenetelmiä, kuten esimerkiksi yksi-, kaksi-, ja kolmipistesäädöt, P-, PI-, PD-, PID (Proportional-Integral-Derivate)-säätö ja sumea säätö. Käytettävä säätömenetelmä valitaan ohjattavan prosessin mukaisesti. Yksinkertaisen prosessin ohjaukseen ei ole välttämätöntä käyttää hienostunutta säätöä, mutta vastavuoroisesti monimutkaista prosessia ei voida hallita yksinkertaisella säädöllä. Tässä työssä keskitytään kaksipistesäädön ja PID-säädön tarkempaan tarkasteluun.

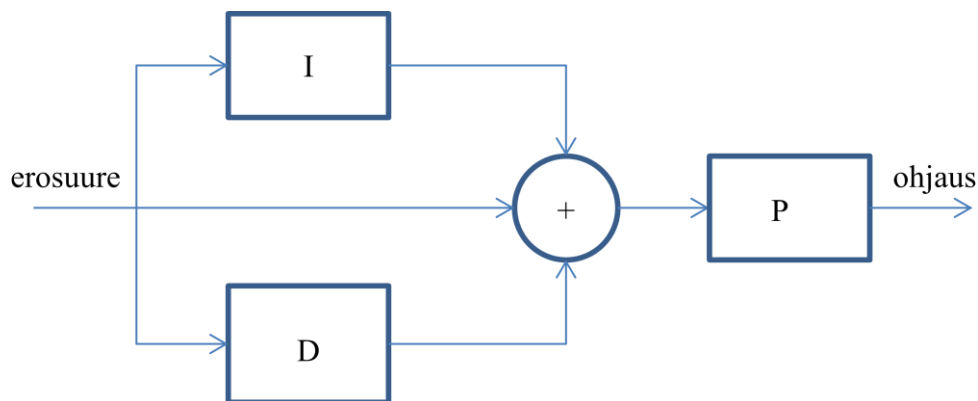
2.3.1 Kaksipistesäätö

Kaksipistesäätö on yksinkertaisin säätömenetelmä, jossa säädin toimii päällä/kiinni periaatteella. Säädin ohjaa toimilaitetta täydellä kuormalla asetusarvon saavuttamiseen asti, jonka jälkeen säädin kytkee toimilaitteen kiinni. Toimilaitteen kytkeytymistä päälle ja pois rajoitetaan ylä- ja alarajalla, joiden sisällä mitattu arvo saa vaihdella. Ilman raja-arvoja, prosessista riippuen, turhan nopea päälle ja kiinni kytkeytyminen pienentää toimilaitteen elinikää. (Savolainen & Vaittinen 2003, 33.)

2.3.2 PID-säätö

PID-säädin koostuu suhdetermistä, integroivasta termistä ja derivoivasta termistä. PID-säätimen termejä voidaan käyttää eri yhdistelminä, eli P, PI, PD ja PID, jolloin säätimen luonne muuttuu yhdistelmästä riippuen. PID-säädintä käytetään takaisinkytketyssä prosessissa. (Harju & Marttinen 2000, 44.)

PID-säätimessä on kolme rakenteellista eroa, miten PID-termit voidaan järjestää: ideaalirakenne, sarjarakenne ja rinnakkaisrakenne. Lisäksi säätimen valmistaja voi tehdä omia rakenteellisia muutoksia, jos ohjattava prosessi sitä vaatii. PID-säätimen rakenne vaikuttaa siihen, kuinka sen eri termit lasketaan yhteen ja onko termeillä yhteinen vahvistus. Tässä työssä esitelty PID-säädin on ideaalirakenteinen (kuvio 2), joka on yleisimmin käytetty rakenne. (Harju & Marttinen 2000, 59.)



KUVIO 2. Ideaalirakenteinen PID-säädin (Harju & Marttinen 2000, 59)

Proportionaalisäätö

KAAVA 1. P-säädön laskentakaava

$$u(t) = K_p e(t) + u_0$$

missä

$u(t)$ = säätimen ohjauksen arvo

K_p = säätimen vahvistus

$e(t)$ = erosuure

u_0 = alkuohjaustaso

P-säädössä ohjauksen arvo on suoraan verrannollinen erosuureen arvoon, joten erosuureen kasvaessa myös ohjaus kasvaa. Kaavasta 1 nähdään, että ohjaus lähestyy nollaa, kun erosuure lähestyy nollaa, huolimatta siitä, kuinka iso vahvistuksen arvo on. Tästä voidaan päätellä, että pelkällä P-säädöllä ei ohjausta saada asettumaan samaan arvoon asetusravon kanssa, paitsi jos säätimelle syötetään nolasta poikkeava alkuohjaustaso u_0 . P-säädön tarkoituksena on nopeuttaa järjestelmän käyttäytymistä. (Harju & Marttinen 2000, 45.)

Vahvistuksen sijaan säätimissä käytetään myös vertoaluetta (Proportional Band). Vertoalue on kääntäen verrannollinen vahvistuksen arvoon. (Harju & Marttinen 2000, 46.) Tämän työn säätimessä käytetään vertoaluetta, jonka ulkopuolella ohjaus on täysin päällä tai pois päältä riippuen siitä, kummalla puolen asetusravoa mittaus on. P-termillä säädetään, miten lähellä asetusravoa ohjaus alkaa pienentyä siten, että suurella vertoalueella ohjauksen pienentyminen alkaa kauempana asetusravosta ja pienellä vertoalueella taas lähempänä.

Integroiva säätö

KAAVA 2. PI-säädön laskentakaava

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right]$$

missä

T_i = integrointiaika (s)

Integrointitermiä käytetään yhdessä P-termin kanssa. Integrointiaika vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti säädin pyrkii savuttamaan asetusravon. Kuten kaavasta 2 huomataan, integrointiaika toimii integrointiosan nimittäjänä, jolloin suuri integrointiaika hidastaa

ohjauksen kasvamista. Erosuureen ollessa nolasta poikkeava integraali summaa erosuureen aika-akselin suhteen pinta-alaksi, josta ohjauksen koko määräytyy. Erosuureen asettuessa noltaan säädin ylläpitää ohjausta, jolla erosuure on saavutettu. (Harju & Marttinen 2000, 47.)

Derivoiva säätö

KAAVA 3. PID-säädön laskentakaava

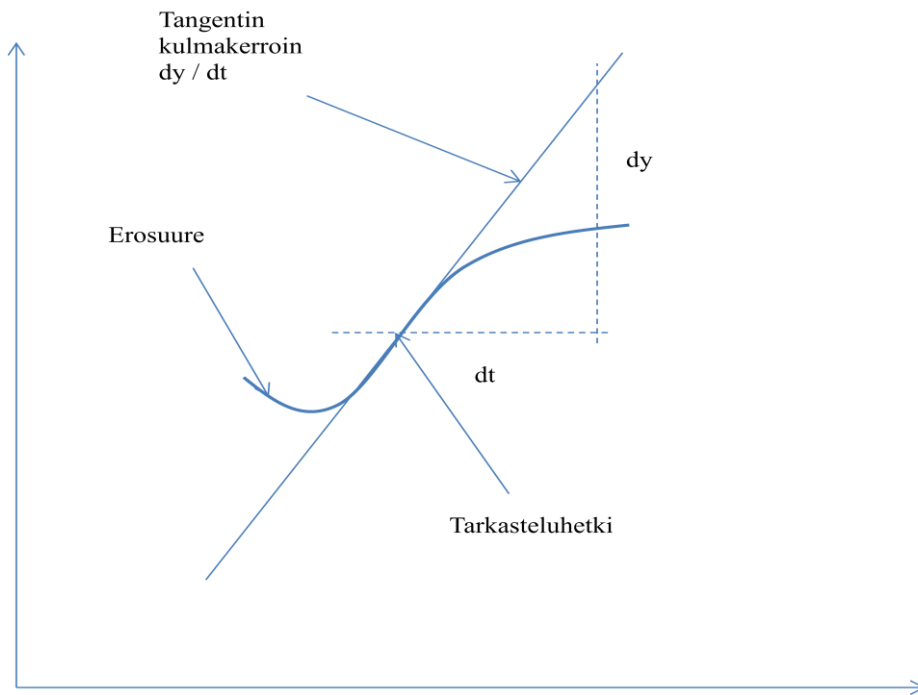
$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

missä

T_d = derivointiaika (s)

Derivointiajalla vaikutetaan siihen kuinka voimakkaasti säädin reagoi erosuureen muutosnopeuteen. Käytännössä derivointiaika toimii derivointiosan kertoimena (kaava 3), kuten integrointiaika toimii integraaliosan nimittäjänä. (Harju & Marttinen 2000, 48.)

Derivoiva säätö pyrkii ennustamaan erosuureen muutosnopeutta siten, että säätimen lähdön arvo on suurempi kuin erosuureen muutos todellisuudessa on. Suurempi arvo tulee erosuureen ajan suhteen tapahtuvan muutoksen derivoinnista tarkasteluhetkellä. Voidaan ajatella, että erosuureen ajan suhteen tapahtuvat muutokset kuvaavat käyrää, jolta valitaan satunnainen piste tangentille. Jos käyrä ei ole lineaarinen, eroaa tangentti aina käyrästä (kuvio3). Tämä tangentin ja käyrän välinen ero selittää, miksi säätimen lähdön arvo on suurempi kuin erosuureen muutos osoittaa. (Harju & Marttinen 2000, 49.)



KUVIO 3. Derivaatan laskeminen (Harju & Marttinen 2000, 49)

2.4 Prosessimalli ja prosessikokeet

Prosessimalli voidaan määrittää kokeellisesti tai teoreettisesti prosessin fysikaalisten ominaisuuksien pohjalta. Kokeellisessa mallissa seurataan ohjauksen muutoksen vaikutusta mitattavaan suureeseen ja vertaillaan näin saatuja tulo- ja lähtösignaaleja. Fysikaalinen malli kuvaa prosessissa tapahtuvia ilmiöitä tieteellis-matemaattisesti, jolloin mallista voi tulla monimutkainen, mutta se kuvaa yksityiskohtaisemmin prosessin kulkua, jolloin toimivan säätötekniikan suunnittelu on kohdennetumpaa. Prosessin mallintamisessa tulee huomioida, mitkä tietyt ilmiöt vaativat säätötekniikan onnistumisen kannalta tarkempaa fysikaalista mallia ja mille vaiheille riittää kokeellinen malli. (Harju & Marttinen 2000, 71.)

2.4.1 Prosessityypit

Prosessit reagoivat eri tavalla askelmaiseen muutokseen, jolloin voidaan erotella eri prosessityypit, joita ovat esimerkiksi yhden aikavakion prosessi, usean aikavakion prosessi ja kuolleen ajan prosessi. Oikean prosessityypin tunnistaminen ja valinta vaikuttavat prosessin ohjaukseen. (Harju & Marttinen 2000, 74.)

Yksinkertaisin prosessikuvaus on yhden aikavakion prosessi, jossa aikavakiolla kuvataan prosessin dynaamista nopeutta. Prosessin muutos toiseen tasoon ei tapahdu askelmaisesti tai lineaarisesti, vaan enemmän logaritmisen käyrän mukaisesti. Yhden aikavakion prosessissa muutos alkaa voimakkaasti, mutta tasaantuminen vie suurimman osan nousuajasta. (Harju & Marttinen 2000, 75.)

Usean aikavakion prosessissa aikavakioita on kaksi tai useampia. Tyypillisesti prosessin alussa on toimilaitteen aiheuttamaa hitautta, mikä näkyy ensimmäisenä aikavakiona, mutta ajan edetessä prosessin (toinen) aikavakio alkaa hallita kokonaiskuva. Ensimmäisen aikavakion ollessa lyhytaikainen verrattuna hallitsevaan aikavakioon voidaan pienempi aikavakio poistaa mallista, jolloin mallista tulee yksinkertaisempi yhden aikavakion prosessi. Aikavakion poistaminen mallista on aina tapauskohtaista ja vaatii harkintaa. (Harju & Marttinen 2000, 75.)

Kuolleen ajan prosessissa on viive askelmaisen muutoksen jälkeen, jonka aikana ei prosessin mittauksessa havaita muutosta. Pitkä kuollut aika vaikuttaa säätöön haitallisesti. Säädin pyrkii koko kuolleen ajan nostamaan ohjausta, koska se ei saa vastetta mittaukselta. Ennustavalla säädöllä tätä voidaan kompensoida, mutta se ei ole kaikissa säätimisessä mahdollista. Kuollut aika voi olla joissakin prosesseissa muuttuva suure. (Harju & Marttinen 2000, 78.)

2.4.2 Kokeellinen prosessimallin määrittäminen

Ennen prosessikokeiden aloittamista on tiedettävä prosessin nopeus. Hitaisiin prosesseihin eivät sovellu tietyt prosessikokeet. Prosessikokeen tyypillä on myös merkitystä

saadun mallin tarkkuuteen, joten käyttäjän tulee tietää kuinka tarkasti prosessi tulee mallintaa. Prosessin tulee olla kokeen aikana normaalissa toimintatilassa ja -alueella. (Harju & Marttinen 2000, 88.)

Prosessille on valittava sopiva näytteenottoväli. Hitailta prosesseilla näytteenotto on 1–3 sekunnin ja nopeilla 0,5–1 sekunnin välein. Näytteiden lukumäärä tulee olla tarpeeksi kattava, jotta niistä pystytään tunnistamaan prosessin käyttäytyminen ja mahdolliset mittauspoikkeamat. Ohjauksen muutoksen suuruus tulee olla tarpeeksi suuri, että muutoksen tunnistaa selvästi mittasignaalista. Muutos ei saa olla liian suuri, sillä muuten prosessi voi mennä yli normaalilta toiminta-alueelta, jolloin mallinnetaan väärä prosessimalli. Lisäksi suuret muutokset ohjaukseen hidastavat prosessikokeen suorittamista. Yleisesti käytetään muutaman prosentin suuruista muutosta koko ohjausalueesta. (Harju & Marttinen 2000, 97.)

Ohjauksen ja mittauksen signaalit täytyy olla samassa skaalassa prosessin oikean vahvistuksen määrittämiseksi (kaava 4 ja 5) (Harju & Marttinen 2000, 80).

KAAVA 4. Mittauksen skaalauslaskentakaava

$$PV_{skaalattu} = \frac{PV - PV_{min}}{PV_{max} - PV_{min}}$$

missä

PV = mittaus

min/max = ala- ja yläraja

KAAVA 5. Ohjauksen skaalauslaskentakaava

$$CO_{skaalattu} = \frac{CO - CO_{min}}{CO_{max} - CO_{min}}$$

missä

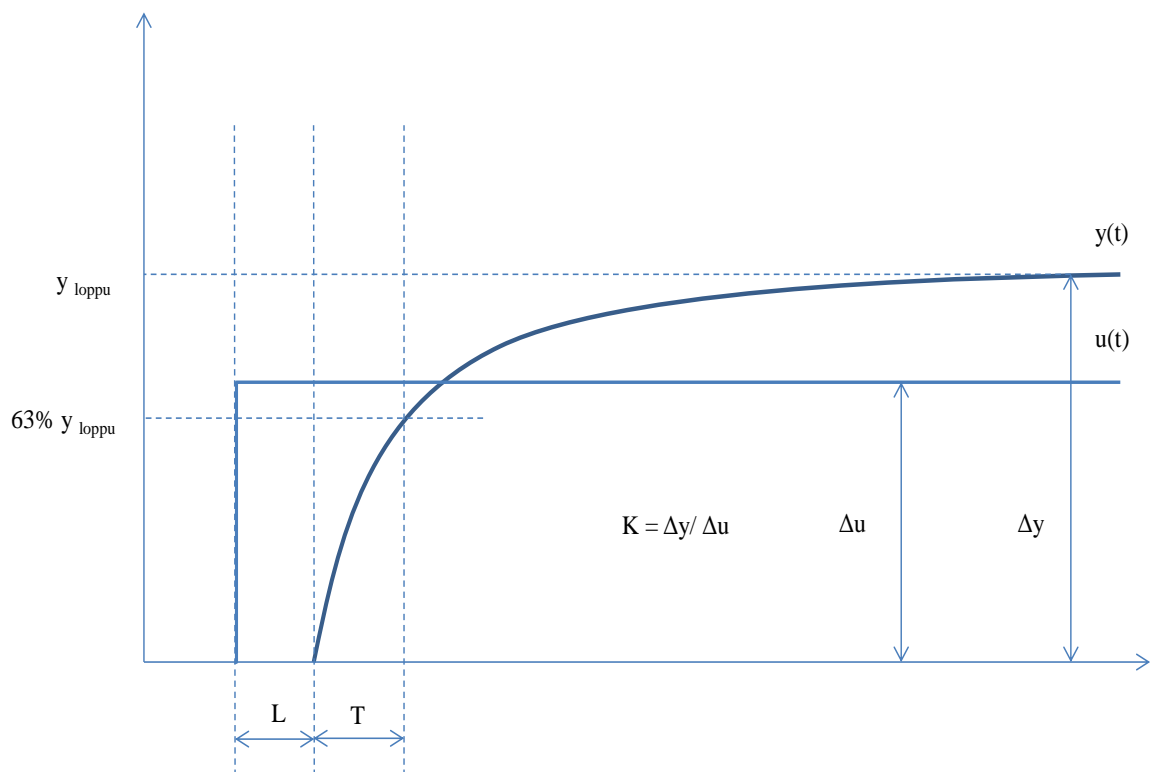
CO = ohjaus

Askelvastekoe

Askelvastekokeen periaate ja toteutus ovat yksinkertaisia. Järjestelmään syötetään askelmainen muutos, jonka jälkeen mitataan prosessin vastetta muutokseen. Askelvastekoe voidaan tehdä joko käsiohjauksella tai automaatiotilassa. Käsiohjauksella tehtävä ohjauksen muutos tarkastelee prosessia. Automaattiohjauksella tehtävä asetusarvon muutos tarkastelee koko säätöpiirin toimintaa. (Harju & Marttinen 2000, 74.)

Askelvastekokeessa säätimen ohjaukseen tehdään käsiajolla askelmainen muutos, jonka jälkeen prosessin annetaan asettua uudelle tasolle. Ennen askelvastekokeen tekemistä tulee varmistaa, että prosessi on asettunut lähtötasoon eikä prosessissa tapahdu värähtelyä. Kokeen aikana kerätään mittaustulokset mittaus- ja ohjaussignaaleista. Kokeita on hyvä tehdä molempiin ohjaussuuntiin, sillä prosessi ei välttämättä reagoi samalla tavalla ylöspäin tai alaspäin tehtävään muutokseen. Monimutkaisemmassa askelvastekokeessa tehdään useita peräkkäisiä askelvasteita, jolloin pyritään selvittämään prosessimallin lisäksi toimilaitteen hystereesi sekä se, kuinka pieniin muutoksiin prosessi voi antaa vasteen. (Harju & Marttinen 2000, 89.)

Yhden aikavakion ja viiveen prosessimalli voidaan määrittää askelvastekokeella tehdystä kuvaajasta. Kuollut aika saadaan laskemalla aika, joka kuluu herätteen antamisesta siihen, kunnes prosessissa tapahtuu vaste. Aikavakio voidaan määrittää kuvaajan jyrkimmän nousukohdan tangenttisuoran ja lopputason leikkauspisteestä. Vaihtoehtoisesti aikavakio voidaan määrittää myös siitä nousuajasta, jossa kuvaajan arvo saavuttaa 63 % lopputasosta. Aikavakioon ei oteta huomioon kuollutta aikaa. Mallin vahvistus laskeaan mittasignaalin ja ohjaussignaalin suhteesta (kuvio 4). (Harju & Marttinen 2000, 80.)



KUVIO 4. Yhden viiveen ja aikavakion prosessin askelvastekuvaaja (Harju & Marttinen 2000, 80)

Askelvastekokeella saatava malli ei välttämättä kuvaa riittävän hyvin monimutkaisia prosesseja, mutta sillä on kuitenkin hyvä aloittaa sen yksinkertaisuuden ja nopeuden vuoksi. Askelvastekokeita tulee toistaa useita kertoja, jotta voidaan varmistua mallin luotettavuudesta kyseiselle prosessille. (Harju & Marttinen 2000, 96.)

2.5 PID-säädön viritys

Viritystä suunniteltaessa tulee tietää prosessin säätötavoitteet, kuten hallitaanko säädöllä asetusarvomuutoksia vai kompensoidaanko kuormitushäiriöitä. Lisäksi halutaanko prosessista mahdollisimman stabiili hitaammalla säädöllä vai käytetäänkö nopeaa säätöä prosessin stabiiliuden kustannuksella. Halutun säätötavoitteen lisäksi tulee tietää virityksen epävarmuustekijät. Kuvaako prosessimalli prosessia täysin oikein vai tuleeko mallin pohjalta tehtyyn viritykseen jättää varmuusvara? Prosessi ei välttämättä ole line-

aarinen, jolloin säätö ei toimi samoin koko prosessialueella. Voimakas mittauskohina voi estää kokonaan D-termin käytön. (Harju & Marttinen 2000, 107.)

Prosessimallin simuloinnilla voidaan tutkia kohteen ominaisuuksia päätteen ääressä ilman, että varsinaiseen prosessiin tarvitsee koskea. On kuitenkin hyvä varmistua prosessimallin tarkkuudesta vertailemalla simuloitua vastetta kerättyyn mittausdataan, ennen kuin mallin pohjalta tehdään ratkaisuja. Simuloinnin perusteella määritetään säätimen rakenne sekä se, käytetäänkö säädössä myötäkytkentää tai viiveen kompensointia. Simulointi on hyvä työkalu myös virityksen testaamiseen, sillä sen avulla voidaan arvioida virityksen sopivuutta prosessiin. Simuloinnin aikana voidaan huomata, että asetettuihin tavoitteisiin ei virityksellä päästä, jolloin joudutaan säätötavoitteet miettimään uudestaan. Säädön viritykseen liittyy siis muutakin kuin pelkkä oikeiden viritysparametrien löytäminen. (Harju & Marttinen 2000, 108.)

Hyvää prosessin säätöä on hankala saavuttaa, elleivät säätöpiirin edellytykset sille ole olemassa. Prosessin hallinta on helpompaa, jos avoimen säätöpiirin vahvistus on mahdollisimman suuri, jolloin säätöpiiri on luonnostaan nopea ja tarkka. Säätimellä vahvistuksen kasvatus johtaa helposti prosessin epästabiiliin käyttäytymiseen. Säätöpiirissä kohinaa sisältävät signaalit heikentävät PID-säädön, varsinkin D-termin suorituskkyä. Kohinan suodatus on suositeltavaa näissä säätöpiireissä. (Harju & Marttinen 2000, 109.)

Prosessin ollessa epälineaarinen tulee viritysparametrit määrittää kullekin toiminta-alueelle erikseen, sillä tietylle toiminta-alueelle määritetyillä viritysparametreilla ei voi ohjata luotettavasti toista toiminta-aluetta (Harju & Marttinen 2000, 113). Toiminta-alueen koko riippuu prosessista, ja voimakkaasti epälineaarisisa prosesseissa voi joutua käyttämään linearisointia, jolla epälineaarinen prosessi linearisoidaan pieni toiminta-alue kerrallaan.

Lambda-viritys

Lambda-virityksessä määritellään prosessimallin perusteella suljetulle piirille haluttu aikavakio. Määrittämisessä käytetään lambda (Λ) -termiä, joka on suhdekerroin avoimen ja suljetun piirin välillä. (Harju & Marttinen 2000, 116.) Virityksen suunnittelu aloite-

taan halutusta prosessin käyttäytymisestä suljetussa piirissä, minkä perusteella valitaan piiriin sopiva säädin. Kaavassa 6 on esitelty yhden viiveen ja aikavakion prosessin siirtofunktio.

KAAVA 6. Yhden viiveen ja aikavakion prosessin siirtofunktion laskentakaava

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-sL}}{Ts+1}$$

missä

$Y(s)$ = säädettävä suure

$U(s)$ = ohjaus

K = prosessin vahvistus

L = viive (kuollut aika)

T = aikavakio

Avoimen piirin siirtofunktion perusteella määritetään suljetun piirin siirtofunktio (kaava 7). Suljetun piirin vahvistus on yksi, koska suureen halutaan asettuvan samaan asetusarvon kanssa. Viive on sama avoimen piirin kanssa, koska prosessin viivettä ei voida muuttaa virityksen avulla. Λ -arvolla määritetään suljetun piirin aikavakion suuruus. Kun $\Lambda < 0$, on suljetun piirin aikavakio pienempi kuin avoimen piirin aikavakio. (Harju & Marttinen 2000, 117.)

KAAVA 7. Suljetun piirin siirtofunktion laskentakaava

$$G_0(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{e^{-sL}}{\Lambda Ts+1}$$

missä

$R(s)$ = siirtofunktion asetusarvo

Λ = viritysparameetri

Kuvion 5 lohkokaavion perusteella johdetaan säätimen rakenne, jolloin säädinrakenteen siirtofunktiosta tulee kaavan 8 mukainen.

KAAVA 8. Säädinrakenteen siirtofunktio

$$G_c(s) = \frac{Ts+1}{K(\Lambda Ts+1-e^{-sL})}$$

Säädinrakenteen siirtofunktion perusteella valitaan sopiva säädintyyppi prosessin säädölle (Harju & Marttinen 2000, 118).

Viritysparametrien laskentakaavat määräytyvät prosessin viiveen ja aikavakion välisen suhteen sekä käytetyn säätimen perusteella. Alla on esitetty PI- ja PID-säätimen viritysparametrien laskentakaavat (kaavat 9–13) prosessille, jossa viive on pieni verrattuna aikavakioon $T > 4L$. (Harju & Marttinen 2000, 123.)

KAAVA 9. PI-säätimen vahvistuksen laskentakaava

$$K_p = \frac{T(2\Lambda+L)}{K(\Lambda+L)^2}$$

KAAVA 10. PI-säätimen integrointiajan laskentakaava

$$T_i = 2\Lambda + L$$

KAAVA 11. PID-säätimen vahvistuksen laskentakaava

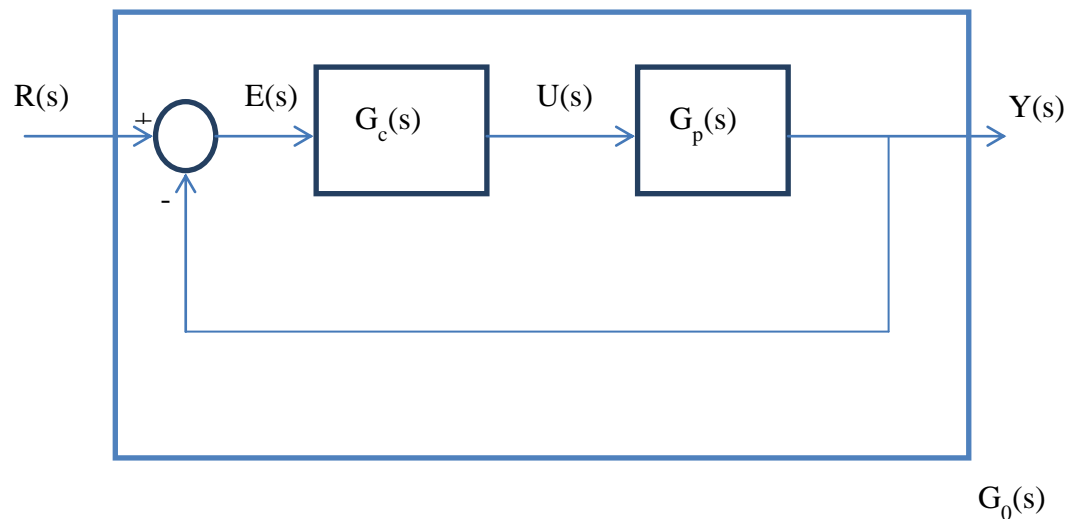
$$K_p = \frac{2T}{K(\Lambda+\frac{L}{2})}$$

KAAVA 12. PID-säätimen integrointiajan laskentakaava

$$T_i = 2\Lambda + L$$

KAAVA 13. PID-säätimen derivointiajan laskentakaava

$$T_d = \frac{\Lambda L + \frac{L^2}{4}}{2\Lambda + L}$$



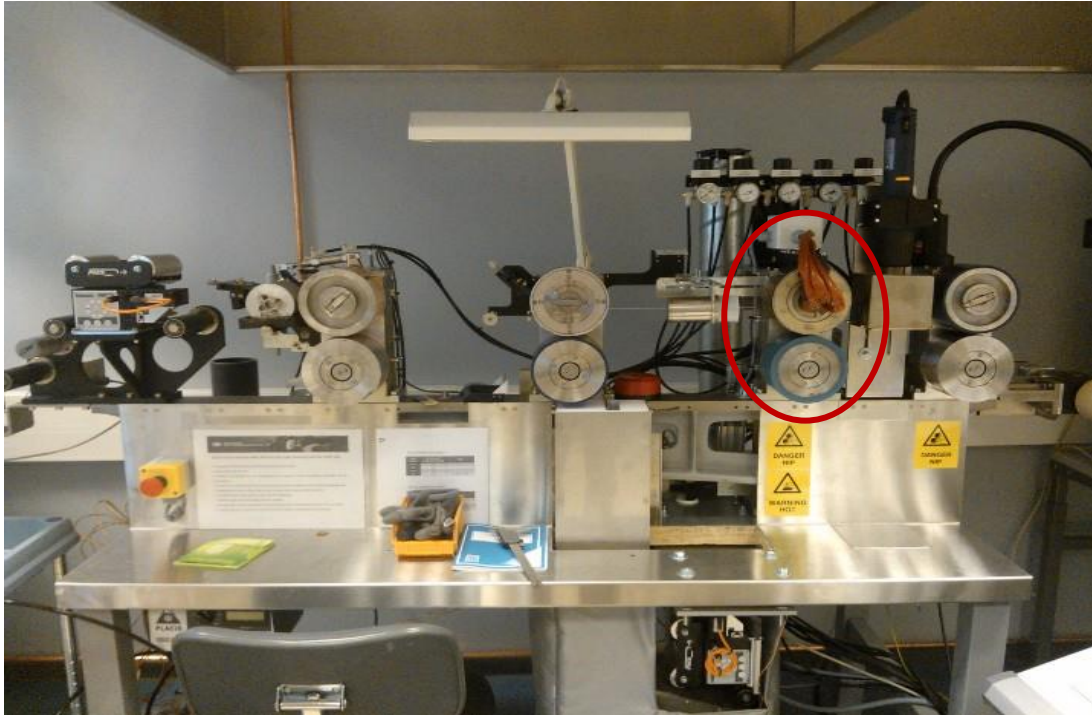
KUVIO 5. Lambda-virityksessä käytetty lohkokkaavio (Harju & Marttinen 2000, 118)

3 KOKEELLINEN OSUUS

Kokeellisessa osuudessa on esitelty laitekanta, menetelmät, mittausjärjestelyt ja tulokset. Säätimen virittäminen perustui teoriassa esitettyihin periaatteisiin, vaikka työn toimilaitteen ohjaustapa ei vastaa teorian portaattonta ohjausta. Ohjauksen erot havaittiin viritysten simuloinneissa, joista saatuja tuloksia tuli soveltaa työssä käytettäväksi.

3.1 Laitteiston esittely

Oulun seudun ammattikorkeakoulun painettavan älykkyyden kehittämislaboratoriossa (Prinlab) sijaitsee rullalta rullalle (R2R) -painokone (kuvio 6), jota käytetään painettavan älykkyyden komponenttien valmistuksen testaamiseen. R2R-painomenetelmä on pitkään käytössä ollut painotapa, jota käytetään vieläkin esimerkiksi painotaloissa. Koneessa on kolme eri painoyksikköä. Kaksi ensimmäistä ovat Flexo- ja Gravure-yksiköt, joilla painetaan mustetta koneessa kulkevalle muovialustalle painotelojen pyöriessä. Kolmas painoyksikkö on kuumapuristusyksikkö, joka poikkeaa kahdesta muusta yksiköstä painotekniikaltaan. Yksikkö ei lisää materiaalia muovikalvolle, vaan muokkaa itse muovikalvoa paineen ja lämmön avulla. Yksiköllä painetaan mikrofluidistisia kanavia ja hologrammikuvioita (kuvio 7).



KUVIO 6. R2R-painokone, jossa kuumapuristusyksikkö on ympyröity.

3.1.1 Kuumapuristusyksikkö

Kuumapuristusyksikkö koostuu painotelasta, vastatelasta, moottorin akselist ja vastuksesta. Painotelassa käytetään vaihdettavia, noin yhden millimetrin paksuisia painohioja, joihin on muotoiltu painokuvio. Painotelaa lämmitetään kuudella 100 watin patruunavastuksella, jotka on sijoitettu alumiinisen sylinterin kehälle tasavälein. Yksinkertaistettuna tätä pakettia voidaan sanoa 600 watin lämmitysvastukseksi. Lämmitysvastus on sijoitettu telaa pyörittävän akselin sisälle, jonka ympärillä painotela on. Painotelaa lämmitetään siis sisältä ulospäin.

Painoprosessissa muodostuu huomattava määrä hukkalämpöä, joka johtuu painotelasta vastatelaan ja suoraan lämpövastukselta moottorin akselin kautta painokoneen rakenteisiin. Myös osa hukkalämmöstä kuljettuu telan pinnasta ympäröivään ilmaan. Painoyksikön hukkalämpö havaitaan vertailemalla vastuksen sisälämpötilaa telan pintalämpötilaan. Kun vastuksen sisällä olevalla termoparilla mitataan noin 140 °C:n lämpötila, on telan pinnassa lämpötila noin 110 °C.

3.1.2 Muovialusta

Muovialusta voi olla useaa eri materiaalia, joka käyttäytyy eri tavalla eri lämpötiloissa. Tärkeimmät rajapintalämpötilat ovat muovin lasisiirtymä- ja sulamislämpötila. Lasisiirtymälämpötila on lämpötila-alue, jossa muovin rakenne alkaa pehmetä ja joka, mahdollistaa muovin uudelleen muotoilun. Painettavan muovialustan paksuus on tyypillisesti välillä 125–250 mikrometriä.



KUVIO 7. Kuumapuristusyksiköllä painettu hologrammikuvi, josta hyvän kuvan saaminen kameralla oli haastavaa

3.1.3 Säädin

Kuumapuristusyksikön säätimenä käytetään DREWS 5300-mallista kontrolleria, jota voidaan käyttää 2-piste-, 3-piste-, PID-säädöllä tai käsiohjauksella. Ohjaus on kontrollereissa toteutettu pulssisuhteella, joka tarkoittaa toimilaitteen päällä/pois -oloaikaa. Esimerkiksi ohjauksen arvolla 50 % on toimilaite päällä täydellä teholla puolet jaksonajasta. Pulssin jaksonaikaa voidaan säätää 0,5–240 sekunnin mittaiseksi. Pidempää jakson-

aikaa suositellaan käytettäväksi toimilaitteissa, jotka ovat herkkiä jatkuvalle kytkeytymisestä aiheutuvalle rasitukselle. Lyhempää jaksonaikaa käytetään nopeissa säädöissä kuten esimerkiksi moottorin ohjauksessa. Säätimen vahvistusarvo annetaan vertoalueena, jonka yksikkö on prosenttia (%). Integrointi- ja derivointitermi annetaan sekunneissa. (Microprocessor based multifunctional controller, DREWS Electronic GmbH, Hakupäivä 27.11.2013.)

3.2 Kokeen alkutilanne

Painotelan kuuden kilon massa aiheuttaa huomattavan viiveen lämmön siirtymisessä sisäpinnalta ulkopinnalle. Alkuperäisessä mittaustavassa oli lämpötila-anturi sijoitettu lämmitysvastuksen sisään, mikä ei kertonut tarvittavaa telan painopinnan lämpötilaa. Lämpötila tuli aina erikseen mitata erillisellä mittavälineellä, mikä oli telan pyöriessä hankala toimenpide. Prosessin ylösajon ja asetusarvomuutosten kannalta telan sisällä oleva mittausta paikka on haastava. Oletetaan, että telan pintalämpötilaa halutaan nostaa 100 °C:sta → 110 °C:seen, mikä tarkoittaa vastuksen sisällä noin 140 °C:n lämpötilaa. Säätimeen asetetaan asetusarvoksi 140 °C ja odotetaan telan lämpenemistä. Näin ei kuitenkaan käytännössä voida tehdä, koska telan lämmitys ja lämmön tasaantuminen veisivät kymmeniä minutteja. Käytännössä telaa lämmitettiin ensin käsikäytöllä täydellä teholla noin 107 °C:n pintalämpötilaan, jonka jälkeen käsikäytöltä siirryttiin takaisin automaattitilaan. Lämpötila nousee jälkilämmöllä noin 110 °C:seen, missä sitä pyrittiin pitämään 140 °C:n asetusarvolla.

Prosessin aikana automaattisäätö ei toiminut ollenkaan. Merkittävät telan pinnan lämmönvaihtelut anturi havaitsi pitkän ajan kuluttua, muutaman asteen vaihtelut eivät vaikuttaneet anturiin ollenkaan. Testien aikana huomattiin, että telan pintalämpötila vaihteli jopa kymmenen astetta ilman jatkuvaa säätimen käsikäyttöä. Huomioitava on myös se seikka, että vastuksen koko lämmitysteho oli käytössä vain säätimen käsikäytöllä.

3.3 Prosessikokeet

Etukäteen tiedettiin, että telan lämpötila muuttuu hitaasti ja prosessissa ei ole huomattavaa värähtelyä, joten sopivin testimenetelmä prosessimallin määrittämiseen oli askelvas-tekoe. Koe suoritettiin prosessia vastaavassa tilassa pois lukien kalvomateriaali, joka ei vaikuta merkittävästi telan pintalämpötilaan. Lisäksi kalvomateriaalia olisi kulunut noin 150–180 metriä jokaisessa testissä.

3.3.1 Mittausjärjestelyt

Mittausvälineinä testeissä käytettiin seuraavia laitteita:

- K-tyypin termopariliuska mittaustarkkuudeltaan $\pm 2,2$ °C mittaalueella 0–260 °C. Mallimerkiltään Fluke 80PK-3A.
- Fluke 80TK liitettiin termoparin ja oskilloskoopin väliin, jolloin se konvertoi K-tyypin termoparin millivoltti (mV) signaalin muotoon, joka voitiin lukea oskilloskooppista lämpötilana °C.
- Agilent U1604A oli dataa keräävä oskilloskooppi, josta mittaustieto saatiin siirrettyä tietokoneelle.

Termopariliuska kiinnitettiin suoraan telan ulkopintaan (kuvio 8). Näyteväliksi valittiin kaksi sekuntia ja lämpötila mitattiin yhden desimaalin tarkkuudella. Termopari kytkettiin mittaustiedot keräävään oskilloskooppiin, josta mittaustieto tallennettiin tietokoneelle. Yksikön ympäröivän tilan lämpötila pysyi laboratorio-olosuhteissa samana ± 1 °C:n tarkkuudella, joten ympäristöolosuhteiden ei oletettu vaikuttavan lämmitystesteihin. Telan pyöriessä termopariliuskan ja telan pinnan välille syntyi kitkalämpöä. Telan pyörimisnopeus kuitenkin pidettiin samana, joten muodostuneen kitkalämmön oletettiin pysyvän vakiona.



KUVIO 8. Mittausjärjestelyt ja laitekanta

3.3.2 Askelvastekokeet

Kuumapuristustelan käyttölämpötila prosessin aikana on välillä 100–150 °C. Käyttölämpötilan suuruuteen vaikuttavat puristettava materiaali, vastatelan puristuspaine ja telan pyörimisnopeus. Pääsääntöisesti käytettävä alustamateriaali vaatii käytettäväksi 105–120 °C:n lämpötilaa, joten prosessimalli määritettiin tämän lämpötila-alueen läheisyydessä. Telan pyörimisnopeutena käytettiin 0,5 m/min. Ennen askelvastekokeen aloitusta tela lämmitettiin 103 °C:seen ohjauksen arvolla 23 ja annettiin tasaantua tähän lämpötilaan. Lähtölämpötilan tasaantumiseen kului aikaa noin neljä tuntia. Lämpötilan tasaantumisen jälkeen ohjauksen arvo muutettiin 25:een askelmaisella muutoksella. Telan lämpötila nousi noin kuusi tuntia, kunnes tasaantui 112 °C:n lämpötilaan. Askelvastekokeitten haasteena oli ajan riittävyys. Lämpötilan tasaantumiseen kului huomattava määrä kokeitten ajasta. Suurin osa kokeista jouduttiin keskeyttämään ennen lämpötilan tasaantumista.

Askelvastekokeitten lisäksi tehtiin useita muita lämmityskokeita, joilla testattiin prosessimallin paikkaansa pitävyyttä ja prosessin lineaarisuutta säätöalueella. Prosessimalli oli määritetty lämmitämällä telaa, mutta se ei kuvannut telan jäähtymistä oikein. Telaa ei voida jäähdyttää muuten kuin luonnollisella lämmönsiirtymisellä. Prosessimallia ei muutettu tämän eron takia, koska telan lämmitystä hitaampi viileneminen on helpommin hallittavissa säätimellä.

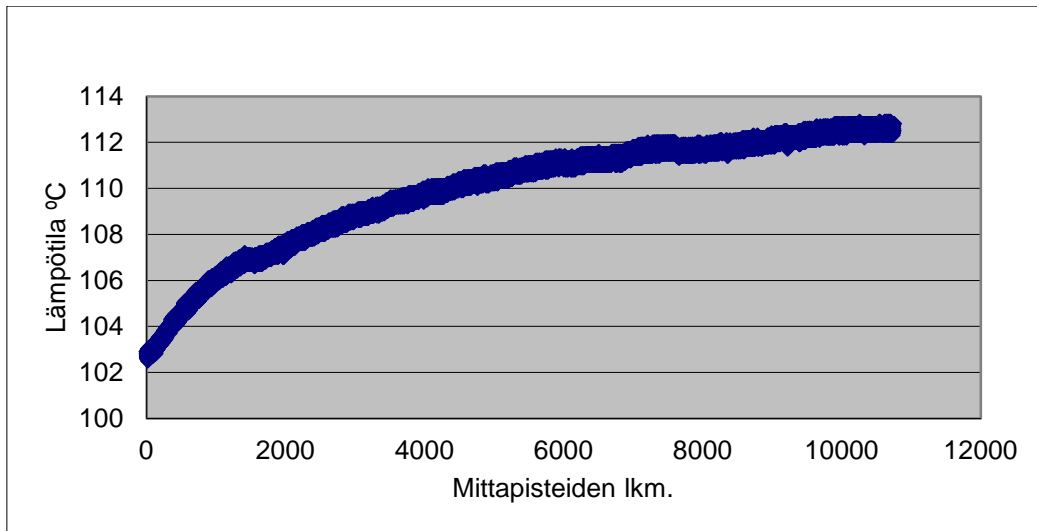
Kuolleen ajan pituus riippui ohjauksen suuruudesta. Telan pinnasta mitattuna kuolleen ajan pituus vaihteli 40–200 sekunnin välillä. Vastuksen ja akselin pinnasta mitattiin näiden vaikutus kuolleen ajan suuruuteen. Vastus reagoi ohjauksen muutokseen muutamassa sekunnissa ja akseli noin kymmenessä sekunnissa. Suurin osa kuolleesta ajasta tuli lämmön johtuessa telan sisäpinnalta ulkopinnalle. Testien aikana mietittiin, tulisiko toimilaitteen toiminta mallintaa omana siirtofunktiona. Koska toimilaitteen saavuttama lämpötila oli kuitenkin riippuvainen telan lämpötilasta, ei toimilaitteen toimintaa voitu erottaa muusta prosessista.

Lämmitystesteissä huomattiin, että telan pinnan lämpötilat vaihtelivat poikittais- ja pituussuunnassa. Syitä tähän on useita:

- Tela luovuttaa lämpöä päätypinnoista, jolloin lämpötila telan keskellä on suurempi.
- Vastuksen ja akselin sekä akselin ja telan välillä ovat rajapinnat, joissa lämmönsiirto riippuu kosketuspinnasta ja sen karheudesta.
- Telan materiaaliominaisuudet eivät ole homogeeniset, jolloin lämmönsiirto ei ole yhtä tehokasta telan joka kohdassa.

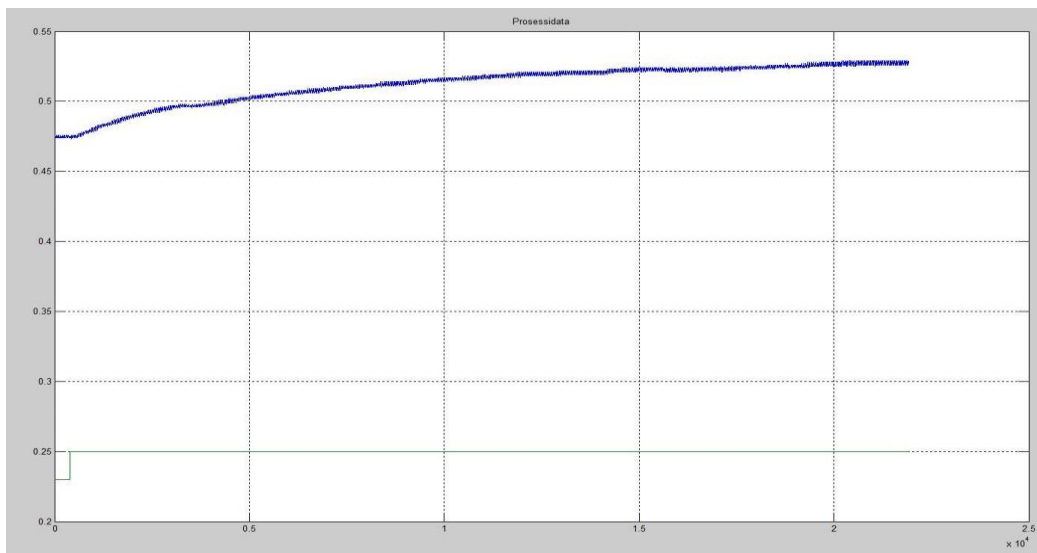
3.4 Mittaustulokset

Mittaustuloksista tarkastettiin mahdolliset trendistä selvästi poikkeavat mittapisteet. Selviä poikkeamia ei ollut ja perättäisten mittapisteiden vaihteluväli oli maksimissaan 0,5 °C. Mittaustulosten perusteella määritettiin kuvaaja, josta voitiin päätellä, että prosessia kuvaa parhaiten yhden viiveen ja aikavakion malli (kuvio 9).



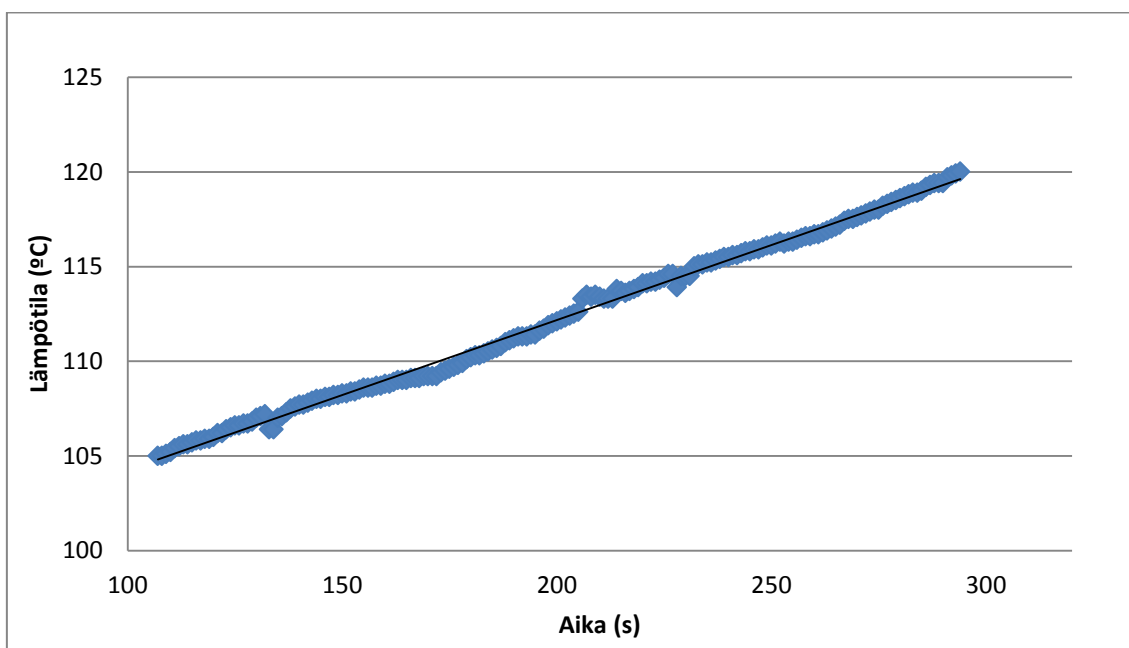
KUVIO 9. Askelvasteen kuvaaja

Mittaustulokset skaalattiin ohjauksen kanssa samaan skaalaan käyttämällä kaavoja 4 ja 5, jotta saataisiin määritettyä prosessin oikea vahvistuskerroin. Lämpötilaa mitataan välillä 15–200 °C ja ohjattiin välillä 0–100. Skaalauksen jälkeen piirrettiin uusi kuvaaja (kuvio 10), josta määritettiin prosessin aikavakioksi 6200 sekuntia, kuolleeksi ajaksi 200 sekuntia ja vahvistuskertoimeksi 2,65. Sijoittamalla arvot kaavaan 6 saatiin prosessin siirtofunktioksi $G(s) = \frac{2,65e^{-200s}}{6200s+1}$.



KUVIO 10. Askelvaste skaalattuna, x-akseli on aika (s) ja y-akseli lämpötila skaalatuilla arvoilla. Ylempi käyrä kuvaa lämpötilan muutosta ja alempi käyrä ohjauksen muutosta.

Prosessin lineaarisuutta säätöalueella tutkittiin maksimiohjauksella, jolloin säätö ei vaikuta prosessin käyttäytymiseen. Lämpötilan nousua seurattiin säätöalueella 105–120 °C. Kuvion 11 trendiviivan perusteella prosessi käyttäytyi lineaarisesti.



KUVIO 11. Prosessin lämpötiläkäyrä maksimi ohjauksella

3.5 Anturin valinta ja käyttöönotto

Prosessin käytön kannalta oleellisinta on tietää telan pintalämpötila. Myös prosessin säädön kannalta on toivottavaa, että pintalämpötilaa voidaan säätää telan suoraan eikä välillisesti esimerkiksi telan sisällä olevalla anturilla. Mittauspaikaksi valittiin telan ulkopinta. Telan pyörivä liike rajasi kiinteät anturit pois käytettävistä antureista. Painoprosessi asettaisi anturille suuret paineenkesto- ja kokorajoitukset. Lisäksi otettiin huomioon, ettei anturi häiritsisi painoprosessia. Kaupalliset anturitoimittajat suosittelivat ensisijaisesti rullien lämpötilamittaukseen infrapuna-anturia.

Telan painopintana käytetään joko kirkasta tai hologrammikuvioista metallia. Työn alkuperäisenä tarkoituksena oli mitata lämpötila suoraan metallipinnalta, jolloin mittauspaikka pystyttäisiin valitsemaan tapauskohtaisesti. Anturitoimittajilta tuli kuitenkin riskiä tietoa siitä, miten tarkasti pystytään mittaamaan alle 200 °C:n pintalämpötilal-

taan olevaa kirkasta metallipintaa. Eräs toimittajista esitti, että luotettavaan mittaamiseen tarvitaan 10 000 € hintaluokan anturi ja suositteli telan pintaan maalattavaksi mattamusta raita, josta lämpötilan pystyy mittaamaan luotettavasti alle 1 000 € hintaisella anturilla. Erikoisoptiikkaa käyttäen infrapuna-anturilla voitaisiin mitata lämpötila halkaisijaltaan alle 2 mm:n kokoisella mittapisteeellä. Painopinnasta lämpötilan mittaamiseen uhrattava raita pienellä varmuusalueella olisi leveydeltään 3 mm, mikä olisi hyväksyttävissä, kun otetaan huomioon anturien hintaero ja luotettavampi mittaus.

Hankittu infrapuna-anturi oli mallia Optris CSLaserLT, jolla pienin mittakeilan koko oli halkaisijaltaan 1,4 mm, kun anturi asennettiin 70 mm:n etäisyydelle mitattavasta kohteesta (LIITE 1). Infrapuna-anturin toistotarkkuus oli $\pm 0,5$ % mittaustemperatuurista, joka on tyypillisesti välillä 100–150 °C. Lisäksi telan reunassa pitkittäissuunnassa havaittiin pintalämpötilan vaihtelua noin 1 °C. Edelliset seikat huomioon ottaen päätettiin, että realistinen säädön toleranssi olisi ± 2 °C asetusarvosta, mikä oli painoprosessin toleranssin kannalta riittävä.

Kun anturi saapui toimittajalta, optiikan huomattiin olevan vääränlainen. Anturi oli lähetetty perusmallin optiikalla, jolla ei pystytäkään mittaamaan lämpötilaa pieneltä alueelta. Anturin toimittaja myönsi virheen tapahtuneen ja vaihdatti optiikan oikeanlaiseksi. Uudessa optiikalla saapunutta anturia ei kuitenkaan ollut skaalattu halutulle 15–200 °C:n lukuvälille. Skaalauksen pystyi tekemään itse anturin mukana tulleella ohjelmistolla USB-liitännän kautta. Liitääntä varten valmistettiin vanhasta tulostimen johdosta USB-johdo, jolla ei kuitenkaan saatu yhteyttä anturiin. Selvisi, että liityntä vaatii valmistajan oman USB-johdon. Oikealla USB-johdolla skaalauksen muuttaminen ohjelmistossa onnistui ongelmitta.

Anturi kiinnitettiin telineellä 70 mm:n etäisyydelle telan ulkopinnasta. Painopinnan reunaan maalattiin noin 5 mm:n levyinen mattamusta raita, josta lämpötila mitattiin. Anturi kalibroitiin vastaamaan raidan emissiviteettiä huoneenlämmössä. Anturin ulostulo 4–20 mA:n virtaviesti kytkettiin säätimen sisääntuloon. Säädin näytti käyttäjälle lämpötilan virtaviestinä, joten lämpötilan lukemisen helpottamiseksi säätimen lähelle kiinnitettiin virtaviesti/lämpötilamuuntotaulukko. Toinen mitta-alue maalattiin telan kylkeen niitä painopintoja varten, joita ei voitu maalata. Telan kyljestä mittaaminen on säädön kannalta parempi, sillä lämpötila oli vakaampi kuin telan pinnassa. Lämpötilanvaihtelu oli mittauksien perusteella alle aste. Kuitenkin telan kyljen ja pinnan välillä oli mittauksien

perusteella muutaman asteen ero, joka käyttäjän tuli muistaa ja ottaa huomioon konetta käyttäessään.

3.6 Säätimen viritys

Kuumapuristusyksikköä käytetään testiajoissa, joissa tehdään suuri määrä asetusarvon muutoksia. Samalla lämpötilalla ajetaan korkeintaan 15 minuuttia kerrallaan. Viritys suunniteltiin siis mahdollisimman nopeaksi asetusarvomutoksille, jolloin käyttäjän ei tarvitsisi odottaa pitkiä aikoja ennen testien jatkamista. Riittävä stabiilisuus säädölle oli pysyä asetetun toleranssin sisällä. Lisäksi säädön stabiilisuutta auttoi telan noin kuuden kilon massa. Prosessissa ei ollut eikä siihen vaikuttanut ulkopuolelta niin suuria häiriötekijöitä, että niitä olisi tarvinnut huomioida virityksessä. Säädön ainoa häiriötekijä oli telan pintalämpötilan epätasaisuudet, jotka telan pyöriessä aiheuttivat nopeita lämpötilan vaihteluita. Säätimen viritys jäi kuitenkin suuren aikavakion takia niin hitaaksi, että se ei ehtinyt reagoimaan noin nopeisiin lämpötilan muutoksiin.

Viritysmenetelmäksi valittiin Lambda-menetelmä, joka on tarkoitettu rauhalliseen prosessiin hallintaan. Lambda -menetelmän perusajatuksesta poiketen haettiin parametrit, joilla prosessi hakeutuu mahdollisimman nopeasti asetusarvoon ja sallii pienen asetusarvon ylityksen.

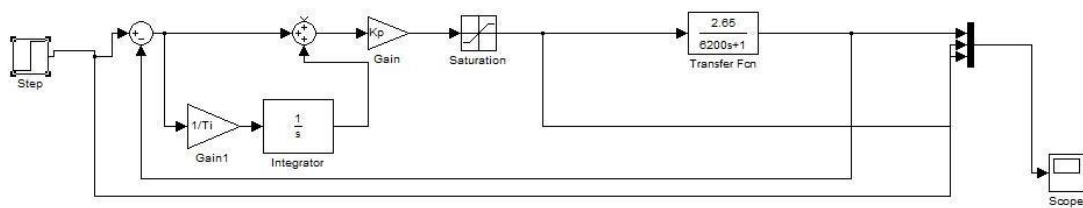
3.6.1 PI-säätö

PI-säätimen viritysparametrit määritettiin kaavoilla 9 ja 10. Ajatuksena oli kaavojen perusteella laskea aikavakiota selvästi pienempi integrointiaika, jolla prosessi käyttäytyy suljetussa piirissä avointa piiriä nopeammin. Lambdan arvoksi valittiin 200, jolla integrointiajaksi saatiin 400 sekuntia ja vertoalueeksi 10 %.

Viritystä simuloitiin Matlab Simulink-ohjelmistolla. Prosessimallissa ollut kuollut aika jätettiin simuloinnista pois, sillä sen pituus riippuu ohjauksen suuruudesta ja tätä riippuvuussuhdetta oli hankala luotettavasti simuloida. Lisäksi kuollut aika oli selvästi aika-

vakiota pienempi, jolloin sen vaikutus säätöön jäi vähäiseksi. Simuloinnilla haettiin viritysparametrit, joilla päästäisiin hyvään perussäätöön, jota voidaan parantaa tarvittaessa prosessin käytön myötä.

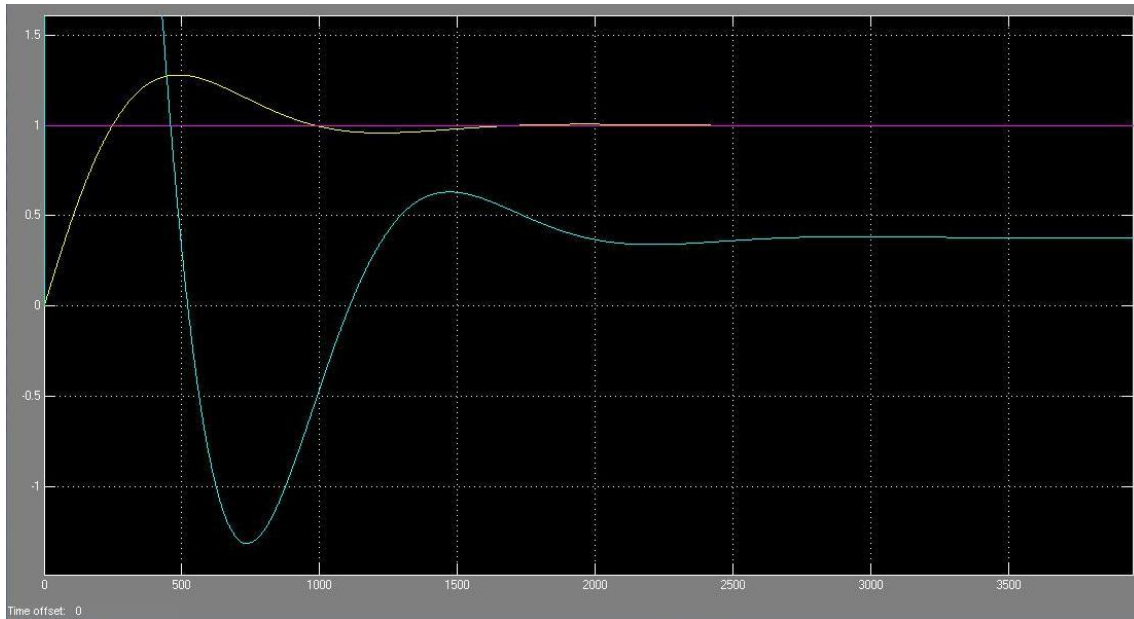
Kuviossa 12 on esitetty simuloinnin prosessikaavio. Simuloinnissa on kuvattu prosessin käyttäytyminen askelmaisen muutoksen jälkeen, minkä perusteella voidaan päätellä, onko prosessin viritys stabiili. Simuloinnista ei voida kuitenkaan suoraan päätellä säädön nopeutta. Huomattiin, että asetusarvon muutoksella ei ole vaikutusta prosessin käyttäytymiseen ajan suhteen. Simuloinnissa käytettiin vertoalueen sijaan vahvistusta.



KUVIO 12. Prosessin säätöpiiri ideaalirakenteisella PI-säätimellä

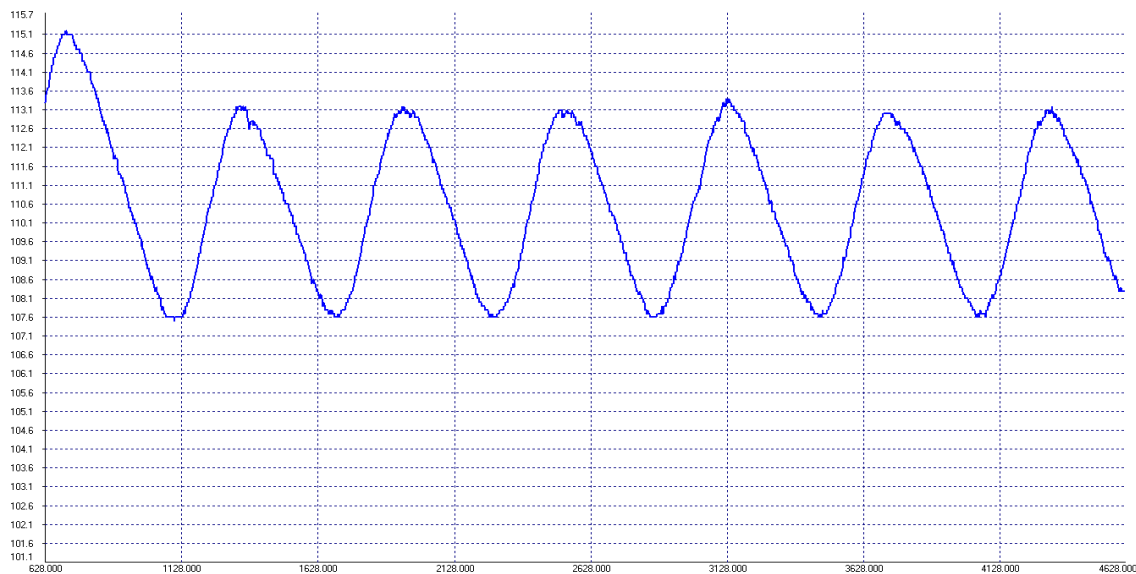
Asetusarvo syötetään Step-lohkoon, josta asetusarvosignaali menee erosuuren summaajan kautta PI- säätimen läpi saturaatiolohkolle, jossa rajoitetaan ohjaussignaalin koko vastaamaan toimilaitteen rajoja. Saturaatiolohkosta ohjaussignaali jatkaa prosessin siirtofunktion kautta signaalin tulostuslohkolle. Integrointilohkon edessä olevaan vahvistuslohkoon syötetään integrointiaika.

Kuviossa 13 on simulointitulokset. Ohjauksen kuvaus simuloinnissa ei suoraan vastaa todellisen ohjauksen käyttäytymistä, sillä sen arvon tulisi vaihtua kokonaisluku kerrallaan $1 \rightarrow 0$. Kuitenkin käyrän voi olettaa ohjauksen keskiarvona, jolloin esimerkiksi ohjauksen arvolla 0,2 vaihtelee todellinen ohjaus nollan ja yhden välillä tietyllä taajuudella. Prosessi ylittää lievästi asetusarvon, jonka jälkeen se asettuu haluttuun arvoon.



KUVIO 13. PI-säätimen virityksen simulointi. Violetti käyrä on asetusarvo, keltainen on prosessi ja sininen on ohjaus

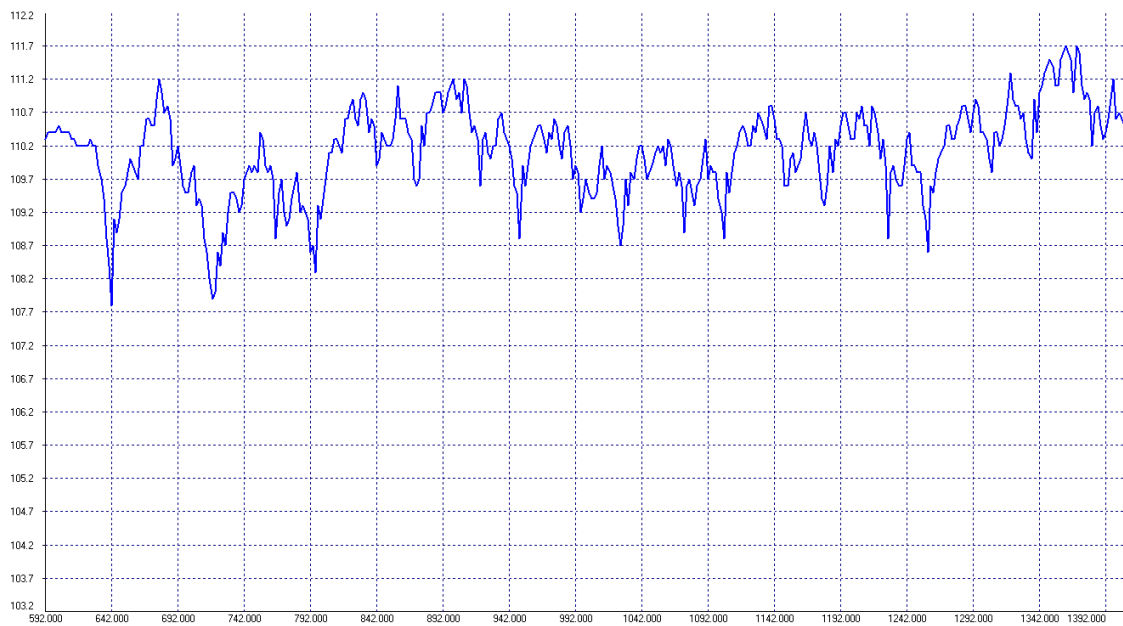
Käytännön kokeessa viritys ei toiminut kuvion 13 mukaisesti. Prosessi saavutti asetusrvon 110 °C nopeasti, mutta se alkoi värähdellä liian suurella amplitudilla (kuvio 14). Kuvaajan perusteella lämpötilan vaihtelu näytti kriittiseltä värähtelyltä. Virityksen vahvistus oli selkeästi liian suuri (pieni vertoalue) tai integrointiaika liian pieni. Tästä seuraavana toimenpiteenä oli virityksen hidastaminen tai D – termin ottaminen käyttöön.



KUVIO 14. Prosessin käyttäytyminen PI-säätimellä. X-akselilla on aika (s) ja y-akselilla lämpötila (°C)

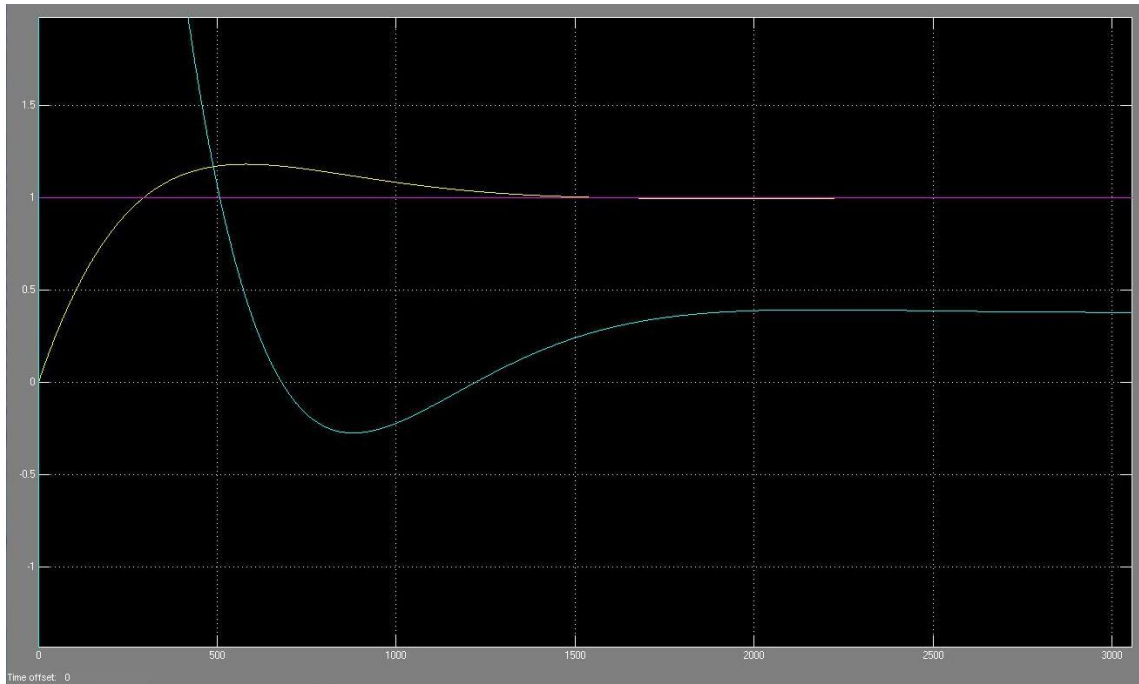
3.6.2 PID-säätö

Epäonnistuneen virityksen jälkeen päätettiin kokeilla säätimen autotune- toimintoa, jolla säädin itse pystyy määrittämään sopivat viritysparametrit. Autotune-toiminto määritteli ohjaimeksi PID-säätimen seuraavilla viritysparametreilla: vertoalue = 4 %, derivointiaika 60 s ja integrointiaika 80 s. Kuviossa 15 on esitetty prosessin käyttäytyminen virityksen jälkeen asetusarvolla 110 °C. Huomioitavaa on, että hieman ennen kuin lämpötila selkeästi tippuu kohdassa 642, tela pantiin pyörimään nopeudella 0,5 m/s. Tiheätaajuisempi lämpötilavaihtelu on telan pintalämpötilan muutoksia, kun tela pyörii. Kun kuvaajaa tarkastellaan pidemmällä aikavälillä, huomataan lämpötilan huojuvan myös harvemmalla taajuudella ja isommalla amplitudilla, minkä aiheuttaa säätimen toiminta. Lämpötilan vaihtelu prosessin aikana pysyi toleranssin sisällä, joten autotune-toiminto näytti toimivan yllättävän hyvin. Kuitenkin havaittiin, että asetusarvomutoksiin säätö oli liian kireä. Prosessi ajoi liikaa yli asetusarvosta, jolloin ylimääräistä aikaa kului lämmön tasaantumisen odotteluun.



KUVIO 15. PID-säätimen viritys Autotune-toiminnolla

Autotune-testi antoi hyvän lähtökohdan PID-säätimen viritysparametrien suunnitteluun, mitkä laskettiin kaavoilla 11, 12 ja 13. Lambdan arvoksi valittiin 100, jolloin integrointiajaksi saatiin 400 s, derivointiajaksi 75 s ja vertoalueeksi 4 %. Säätökäyttäytyminen simuloinnissa oli lähellä PI-säädintä, mutta asetusarvon ylitys oli hieman lievempi ja ohjauksen muutos pienempi (kuvio 16).



KUVIO 16. PID-säätimen virityksen simulointi

Oikeassa prosessissa viritysparametrit toimivat hyvin, jolloin prosessin lämpötila pysyi stabiilina ja lähellä asetusrvoa asetettujen toleranssien sisällä. Kuitenkin havaittiin, että säädin voisi ohjata asetusrvomutoksia terävämmin, joten integrointiaikaa pienennettiin 200 sekuntiin. Tällä muutoksella saatiin tavoitesäätö prosessille. Kuvaajaa ei ole saatavilla tästä prosessikäyttäytymisestä, sillä signaalin talteenotto olisi vaatinut valmisteluja, joita ei ollut mahdollista enää järjestää tässä työn vaiheessa.

PID-säätimen virityksen jälkeen parantuivat alkutilanteen suuret lämpötilavaihtelut, jotka tasaantuivat maksimissaan ± 2 °C vaihteluvälin sisään asetusrvosta. Asetusrvomutokset voitiin suorittaa automaattikäytöllä, jolloin säätimen käsikäytölle ei ollut enää tarvetta. Sovellutetta teoria PID-säätimen virityksestä osoittautui käyttökelpoiseksi työn säätimen virittämiseen asetettujen toleranssien tarkkuudella.

4 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli muuttaa kuumapuristustelan lämpötilan mittauspaikaksi sijainti, josta käyttäjä näkisi telan pintalämpötilan ilman erillisen mittalaitteen käyttämistä. Lisäksi lämpötilasäädin haluttiin virittää uuden mittapaikan mukaisesti siten, että telan pintalämpötila pysyisi vakaana testiajoissa sekä asetusarvomuuтокset tapahtuisivat nopeasti ja vakaasti. Mittauspaikaksi valittiin telan pinta, josta lämpötila mitattiin optisella infrapuna-anturilla. Prosessikokeilla määritetyn prosessimallin perusteella laskettiin säätimen viritysparametrit, joiden laskenta perustui teoriassa käsiteltyihin periaatteisiin. Työn tulos vastasi asetettuihin tutkimuskysymyksiin eli koneen käyttäjä näki telan pintalämpötilan suoraan säätimen näytöltä, erillistä lämpötilamittaria ei enää tarvittu, telan lämpötila pysyi prosessin aikana stabiilina sekä asetusarvomuuтокset nopeutuivat ja olivat vakaampia.

Lämpötilan säätöön käytetystä säätimestä ei löytynyt laadukasta kirjallisuutta, jossa säätimen toimintaperiaatetta olisi tarkemmin esitelty. Suurin haaste työssä olikin soveltaa teoriassa käsitellyn säätimen toiminta käytännön säätimeen. Säätimen ohjauksen simulointi osoittautui erityisen hankalaksi, minkä takia simuloinnissa tyydyttiin oletta-
maan ohjauksen toimintaa. Lambda-virityksen teoriassa oli käytetty esimerkkinä prosessia, jonka viive ja aikavakio olivat yhtä suuria. Työn prosessissa aikavakio oli selvästi viivettä suurempi, jolloin teoriaa ei voitu suoraan soveltaa työssä. Lambda-virityksen periaatteesta poiketen ei suljetulle piirille laskettu säädinrakennetta. Säädintyyppi ja viritysparametrien laskukaavat valittiin suoraan kirjallisuudessa valmiiksi päätellyistä vaihtoehtoista. Säädintyyppin ja viritysparametrien laskentakaavojen valinnassa ei tehty varsinaisesti väärin, vaan siinä oikaistiin.

Kuumapuristusyksikön kehittäminen jatkuu tämän työn jälkeenkin. Telan pinnassa oli selviä lämpötilaeroja, jotka tulisi tasata laadukkaamman painotapahtuman saamiseksi. Aiheeseen liittyvä opinnäytetyö on jo vireillä, ja työ keskittyy telan lämmityksen kehittämiseen.

LÄHTEET

DREWS Electronic GmbH. 2013. Microprocessor based multifunctional controller. Hakupäivä 27.11.2013, http://www.nordela.se/_upload/manualer/ma5300.pdf

Halko, P., Härkönen, S., Lähteenmäki, I. & Välimaa T. 1993. Teollisuuden mittaustekniikka; Perusmittauksia. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus

Harju, T. & Marttinen, A. 2000. Säättöpiirin virityksen perusteet. 1. painos. Espoo: Control CAD Oy

Savolainen, J. & Vaittinen, R. 2003. Säättötekniikan perusteita. Viides tarkistettu painos. Helsinki: Opetushallitus

